2007 年度

卒業研究報告書

HMD を用いた RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムの提案

高知工科大学　工学部　電子・光システム工学科

1080242

國枝惇一

指導教員　星野孝総

2008 年 2 月 19 日

HMD を用いた RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムの提案

國枝惇一

要旨

現在，ヘリコプタは様々な状況において防犯，救援活動，人員や材料の輸送などに使用されている．ヘリコプタは垂直離着陸やホバリングなど，柔軟な動きが可能で，海上や山間部での救助活動に適している．災害が起きた時，ヘリコプタはすばやく現場の状況を得る有効な手段である．

RC（Radio Control）ヘリコプタも，農薬散布，火山観測，環境観測，インフラ(送電線，交通網)保守，原子力施設監視，植物生態調査など，幅広い分野ですでに使用されている．

RC ヘリコプタは，どの航空機よりも迅速かつ容易に特定地域の情報収集を可能にしている. しかし, 操縦に関しては, 実際のヘリコプタより RC ヘリコプタの方が難しいと言われ，初心者の独学の飛行練習は膨大な時間を要す.

そこで本研究では，RC ヘリコプタの操縦技術学習支援システムを開発することで，早期に飛行技術を取得させることを目的としている.

実際のヘリコプタより RC ヘリコプタの方が操縦することが難しいと言われる理由の一つは，操縦者が直観的にヘリコプタと目的地の位置と姿勢を知ることができないという点にある．その問題の解決策として，本研究では， RC ヘリコプタに搭載したカメラやセンサからの映像と情報を合成し, HMD を用いて操縦者に没入感を与える操縦画面を作成することにより，操縦をより直感的に理解させる方法を提案している.

また RC ヘリコプタを操縦する上で必要な感覚的な知識を，シミュレータを用いて学習することで, 実際の RC ヘリコプタを操縦せずともある程度の飛行技術習得を可能にする．初心者の実機での飛行は危険が高い為，ある程度操縦に慣れるという意味でもシミュレータと実機での学習は並行して行う必要があると考える.

本論文は，研究の前段階として，実システム作成にあたって必要なデバイスの作成や，ソフトウェア，予想される問題に関して検討・考察したものである.

私は今後も本研究活動を続けていき，RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムを完成させる.

目次

1. はじめに ・・・ 4

2. 先行研究と本研究の必要性 ・・・ 5
2.1. 自律型無人ヘリコプタに関する研究
2.1.1 産業用ヘリコプタ
2.1.2 小型 EP ヘリコプタの自動制御に関する研究
2.2. 無人ヘリコプタ没入型遠隔操縦システムの研究

3. RC ヘリコプタについて ・・・ 7
3.1. EP ヘリコプタと GP ヘリコプタ
3.2. X.R.B V-2 BELL222 と HIROBO シャトル+2 の特性 ・・・ 8
3.3. X.R.B V-2 BELL222 の操作方法 ・・・ 9
3.4. HIROBO シャトル+2 の操作方法 ・・・ 10

4. RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システム ・・・ 11
4.1. RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムの概要
4.1.1 RC ヘリコプタ基礎学習システムの必要性 ・・・ 12
4.1.2 RC ヘリコプタシミュレーションシステムの必要性
4.1.3 RC ヘリコプタ操縦支援システムの必要性
4.2. RC ヘリコプタ操縦支援システムの概要 ・・・ 13
4.3. RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムの構築手順 ・・・ 16

5. 実験 ・・・ 17
5.1. Flying Model Simulator (FMS)を用いた実験
5.1.1 機体モデルの操作性検証実験 ・・・ 19.
5.1.2 傾度情報の表示方法についての評価実験 ・・・ 20
5.2. X.R.B V-2 BELL222 を用いた実験 ・・・ 21
5.2.1 振動について
5.2.2 シミュレータでの学習による飛行操縦の比較実験 ・・・ 23

6. 問題点と解決案 ・・・ 24
6.1. 機械的な問題
6.2. ユーザーインターフェースの問題
6.3. シミュレータ作成における問題 ・・・ 25
6.4. 操縦支援映像作成における問題

7. おわりに ・・・ 26

謝辞 ・・・ 28

参考文献 ・・・ 29

付録 ・・・ 30

1. はじめに

現在，ヘリコプタは様々な状況において防犯，救援活動，人員や材料の輸送などに使用されている．ヘリコプタは垂直離着陸やホバリングなど，柔軟な動きが可能で，海上や山間部での救助活動に適している．災害が起きた時，ヘリコプタはすばやく現場の状況を得る有効な手段である．

RC（Radio Control）ヘリコプタも，農薬散布，火山観測，環境観測，インフラ(送電線，交通網)保守，原子力施設監視，植物生態調査など，幅広い分野ですでに使用されている．[1] [2]

図.1 様々な産業分野で活躍する YAMAHA の RMAX

RC ヘリコプタは，どの航空機よりも迅速かつ容易に特定地域の情報収集が可能である．

しかし，操縦に関しては，実際のヘリコプタより RC ヘリコプタの方が難しいと言われ，初心者の独学の飛行練習は膨大な時間を要す．

そこで本研究では，RC ヘリコプタの操縦技術学習支援システムを開発することで，早期に飛行技術を取得させることを最終目的としている．

その前段階として，想定できる様々な問題について被験者を使った実験を行い，人間とのインタラクションについて検証する．

その検証結果から，提案システムの有効性を示す．

2. 先行研究と本研究の必要性

2.1. 自律型無人ヘリコプタに関する研究

2.1.1 産業用ヘリコプタ

産業用 RC ヘリコプタとして，図.1 の YAMAHA 製 RMAX などがある．RMAX のスペックを表.1 に示す.

表.1 RMAX のスペック

全長(ロータ含む)	3630[mm]
全幅	720[mm]
全高	1080[mm]
重量	58[kg]
搭載可能容量	30[kg]
連続稼働時間	60[min]

3 章表.2 の HIROBO シャトル+2 のスペックと比べてもわかるように，全長で 3 倍，重量でも 2 倍以上大きい. 複数の加速度センサやジャイロが内蔵された YAMAHA の開発した姿勢制御装置を搭載し，姿勢制御を行っている．このような産業用無人ヘリコプタを使った研究は様々な大学や研究機関で行われている．[3]

2.1.2 小型 EP ヘリコプタの自動制御に関する研究

近年，無人航空機の自動制御が注目されているが，現行の自立制御系では高度な制御性能の要求を満たすことができない. そこで強化学習を用いて，ヘリコプタの自動制御を行うという研究を，神戸大学の多山哲郎らが行っている[4].

強化学習とは，エージェントに模範となる行動を教えずとも，報酬を与えることでエージェント自身に試行錯誤させ学習を行う機械学習の手法の一つである.

この方法では，高度方向，前後方向の 2 次元に限定したシミュレーションでは安定したホバリング制御ができたが，空間を制限しない 3 次元モデルでのシミュレーションは制御できなかったとしている.

結論で，実機での実験も行う必要があると締めくくっているが，安定して飛行しているように見えても，操縦者には微細な予測操作が要求される.

2.2. 無人ヘリコプタ没入型遠隔操縦システムの研究

奈良先端科学技術大学院大学の小枝正直らの研究[5]では，RC ヘリコプタにおいて，操縦の難しさは操縦者と機体の相対位置の変化にあるとしている．その問題を解決する為に RC

ヘリコプタにカメラとトランスミッタを搭載し，HMD(Head Mounted Display)に映像を表示させるという解決策を提示している．

また，目視で確認できない場合でも，カメラからの映像により飛行を継続できるとしている．カメラは全方位カメラを搭載し，HMD 上部につけた角度センサで頭の傾きを測定，操縦者の視線方向の映像を表示する．

フライトシミュレータを使った検証実験も行っており，通常飛行モードと没入操作モードでのタスク達成時間の短縮が確認でき，操作性の向上を実証した．

しかし，実際に飛行させるにはカメラ映像だけでは不十分で，安全に飛行させる為には常に目視で確認する必要があるとしている．

本論文では，同一の課題をユーザーインターフェースに重点を置いたシステムで没入感を補った操縦支援システムで解決することを提案する．

3. RC ヘリコプタについて

3.1. EP ヘリコプタと GP ヘリコプタ

図.2 予備実験に使用した有線操作型の
EP ヘリコプタ　X.R.B V-2 BELL222

図.3 本実験に使用する無線操作型の
GP ヘリコプタ　HIROBO シャトル+2

表.2 EP ヘリコプタ[X.R.B V-2 BELL222]と
GP ヘリコプタ[HIROBO シャトル+2]のスペック

種類（操縦系）	EP ヘリコプタ（有線）	GP ヘリコプタ（無線）
機種名	X.R.B V-2 BELL222	HIROBO シャトル+2
全長	410 [mm]	1075 [mm]
全幅	145 [mm]	210 [mm]
全高	200 [mm]	415 [mm]
メインロータ径	350 [mm]	1244 [mm]
重量	200 [g]	2790 [g](乾燥重量)
駆動系	二重反転ロータ	シングルロータ
動力源	バッテリー	グロー燃料、バッテリー
操作範囲	5 [m]	~100 [m]
搭載可能容量	数 10 [g]	数 100 [g]
連続稼働時間	20[min]	15 [min]
待機時間	5[min]	15[min]（充電時間）

RC ヘリコプタには，EP ヘリコプタと GP ヘリコプタの二種類がある．

EP(Electric powered)ヘリコプタとは, 電動モータでロータを回転させるヘリコプタで GP ヘリコプタと比べ軽量で小型であるという特徴がある．

GP(Gas powered)ヘリコプタは，グロー燃料を原料としてエンジンでロータを回転させる．

今回の実験に使用した EP，GP ヘリコプタ(図.2,図.3)は，大きさ，重量ともに大きく差が開いたものだが，屋外でも飛行できる EP ヘリコプタはもう少し大型のものになる．

大きな違いは，EP ヘリコプタはモータ駆動の為振動が多く，飛行に必要な充電時間が長いなどの欠点がある．GP ヘリコプタは可燃物を燃料とするため取扱に十分注意する必要があり，エンジンによる騒音も大きい．

3.2. X.R.B V-2 BELL222 と HIROBO シャトル+2 の特性

X.R.B V-2 BELL222 は，EP ヘリコプタの中でも特に小型で，屋内専用に設計された RC ヘリコプタである．有線方式というのが大きな特徴で，有線で操作，電源の供給を行う為，バッテリーを搭載しない分軽量で小型であるが，モータの発熱などによる性能への悪影響を防ぐ為，20 分以上の連続飛行はできない．

小型ヘリコプタの中でも安定して飛行できる機体で, 正しく調整されていれば素人でも簡単にホバリングさせることができる．

ブレード(翼)が発砲スチロール製の為，比較的安全で，初心者の入門機に向いていると思われる．

HIROBO シャトル+2 は，GP ヘリコプタの中でも小型で入門者向けの 30 クラス(排気量 5cc)と呼ばれる部類に入る．入門者向けと言っても全長は 2m 近くあり，初心者が心得もなく飛ばせるものではない．

思い通りに飛ばすまでになるには数ヶ月から数年かかると言われるほど扱いが難しく, 何より屋外で飛ばす必要があるため，周囲の人や建物に十分注意しながら飛行させる必要がある．また，グロー燃料という可燃物を燃料にするので，火気にも十分な注意が必要である．

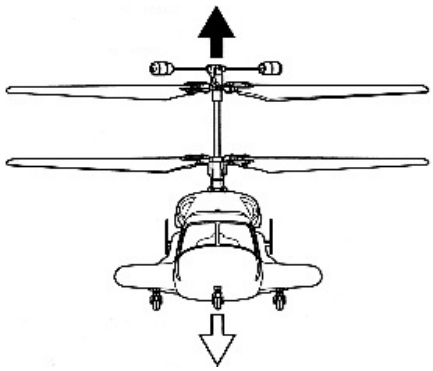
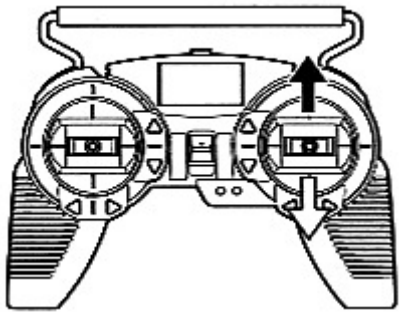
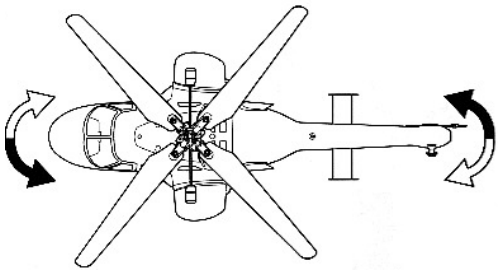
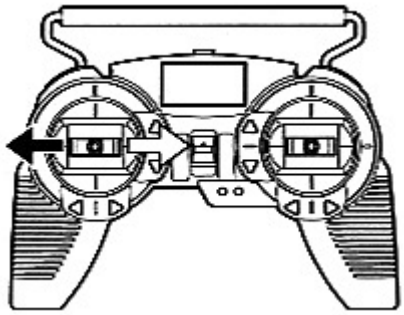
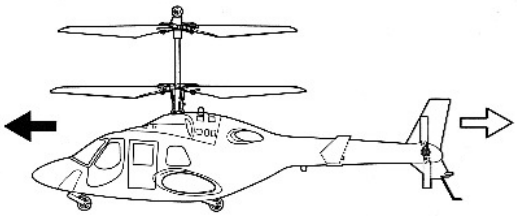
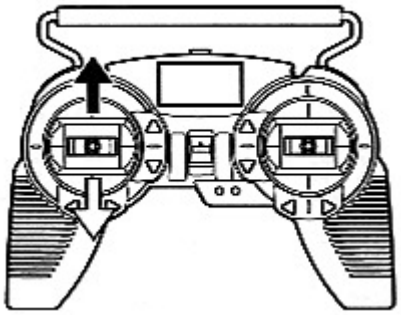
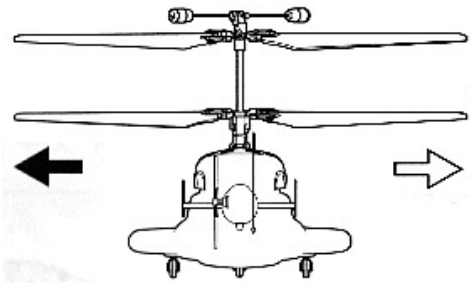
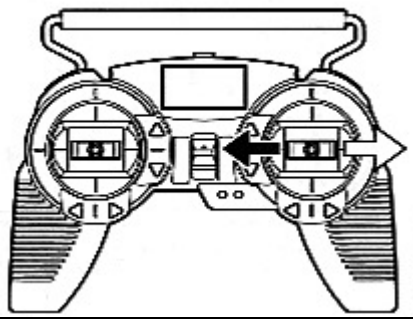
風などにも多く影響され, 操縦者が風を体感しなくても機体はかなり流されているという事態も十分にありえる．

以上のように室内用 EP ヘリコプタと比べると危険度や難易度がかなり高い．

EP ヘリコプタは，小型で初心者にも扱いやすい為，予備実験やシミュレータでの学習成果を量る為に使用する．本実験では，汎用性が高く，センサ等の機器類が GP ヘリコプタを使用することにした．

3.3. X.R.B V-2 BELL222 の操作方法

表.3 機体の動きとスティック操作

スロットル		
ラダー （ヨー）		
エレベータ （ピッチ）		
エルロン （ロール）		

日本で一般的な RC ヘリコプタは，表.3 のようなスティック操作で行う．[6]

基本的な操作は EP ヘリコプタも GP ヘリコプタも同じなので，詳しくは次節の 3.4.の **HIROBO シャトル+2 の操作方法**で説明する.

3.4. HIROBO シャトル+2 の操作方法

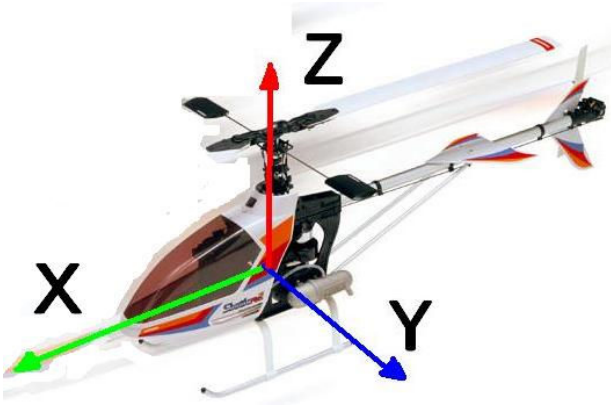


図.4 RC ヘリコプタと XYZ 軸の方向

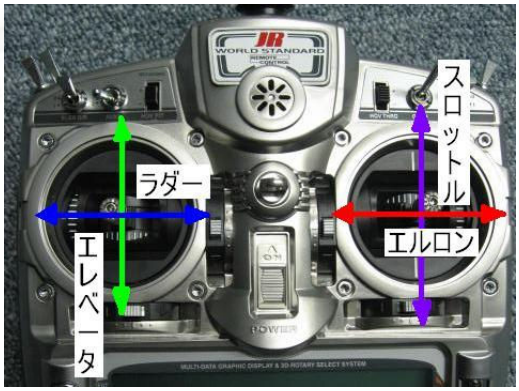


図.5 プロポ(送信機)のスティック操作

RC ヘリコプタの操作は，2 本のスティックを、それぞれ上下・左右の二軸、合計四軸に動かして制御する．スロットルはエンジン出力を調整し，ロータの回転数に影響する．エレベータは X-Z 平面の方向(ピッチ角)を，エルロンは Y-Z 平面の方向(ロール角)をメインロータの傾きによって操作する．ラダーは Y-Z 平面の方向（ヨー角）を主にテールロータの回転数で制御する．

しかし，通常の RC ヘリコプタは，常に同じ場所で静止し続けようとするわけではない．
機体の振動や風，その場の状況に応じてわずかに移動したり傾いたりする．その動きから次の動きを予測し，それを打ち消すようにスティックを動かすことで，ホバリング状態を維持できる．
GP ヘリコプタの場合，機体が大きい為，わずかな移動が大きな移動になり，初心者はホバリングを維持すること事態難しい． RC ヘリコプタにカメラを搭載し，その映像を操縦者に提示しても，ホバリングなどの基本的な技術の学習にはならない．

そこで，実機にカメラを搭載するだけでなく，シミュレータや技術資料・映像などで，操縦者に多角的な視点で学習させることが重要である．

4.RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システム

4.1 RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムの概要

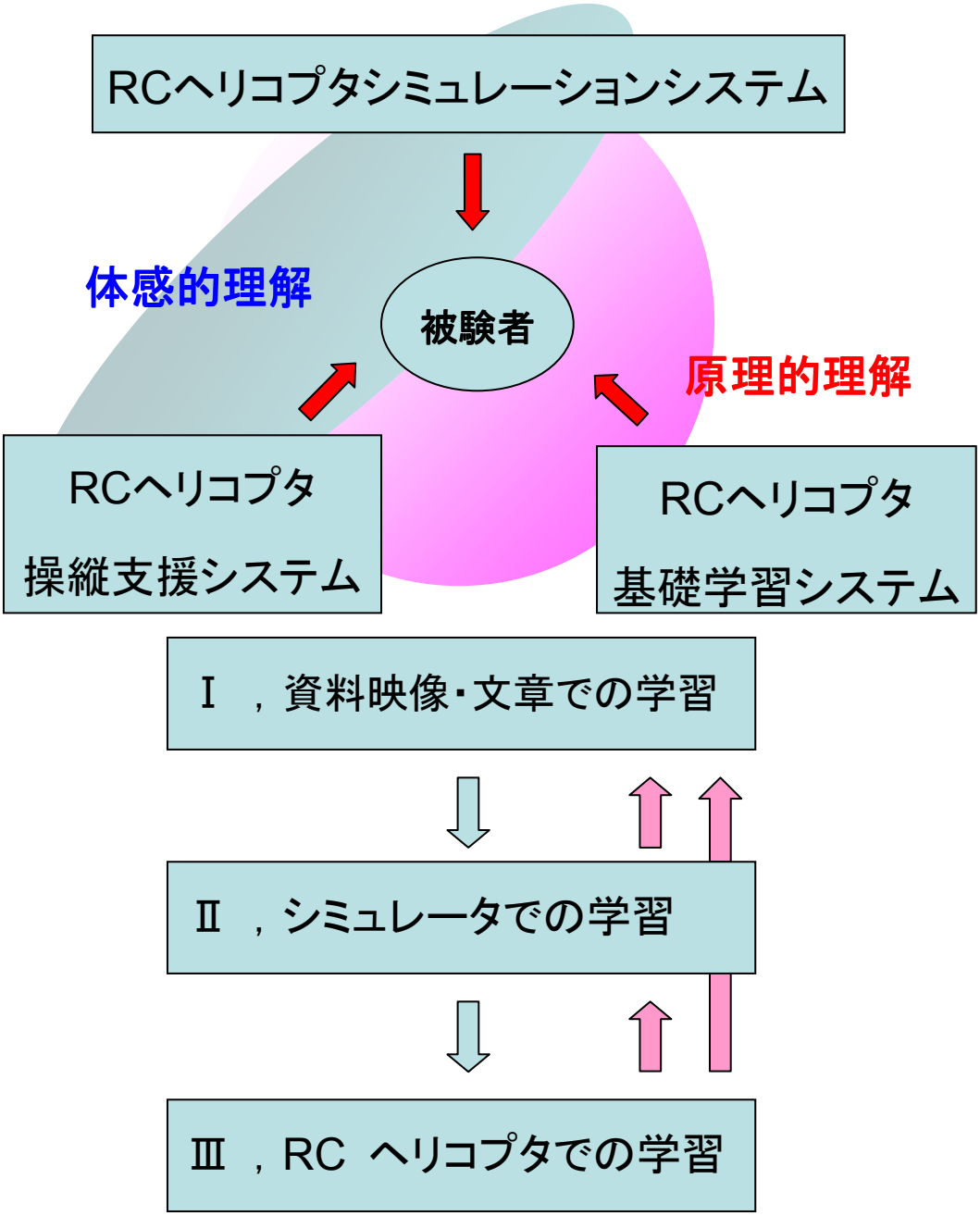


図.6 システム概要図(上)と学習手順(下)

RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムの概要を図.6 に示す.

本システムは，RC ヘリコプタ基礎学習システム，RC ヘリコプタシミュレーションシステム，RC ヘリコプタ操縦支援システムの 3 つから構成される．基礎知識や予備知識など，RC ヘリコプタを操縦する上で知識として形式的に示せるものが図.6 の RC ヘリコプタ基礎学習システムにあたる．それを取得した上で，実際の GP ヘリコプタの飛行練習に入る前に，RC ヘリコプタシミュレーションシステムで基本動作の確認，RC ヘリコプタの特性をある程度把握してもらう．そして最後に，カメラやセンサなど，RC ヘリコプタ操縦支援システムを搭載した GP ヘリコプタを操縦してもらう．

学習者はこれらの 3 つのシステムを行き来することで，効率的に操縦技術獲得を目指す．

4.1.1 RC ヘリコプタ基礎学習システムの必要性

RC ヘリコプタ，特に GP ヘリコプタを扱う場合，様々な危険が伴う．

GP ヘリコプタは，エンジンを搭載し，その力でロータを回転させる．エンジンの始動には点火作業が必要で，点火時はブレード(翼)に強力な回転力が働く．この際，正しくブレードを押さえておかなければ，ブレードの先端が 300km/h で回転しだす危険もある．

燃料やエンジン，トラッキング調整(ロータの回転面を水平にする作業)など，実際に GP ヘリコプタを飛行させるまでに必要な手順や予備知識は多い．

これらを事前に学習させることは，操縦技術の学習以前に必要になる．本システムは資料映像や文章による学習で，基礎となる知識の取得を目指す．

この資料映像，文章作成にあたっては，技術的内容のドキュメンテーション，初心者にわかり易い映像の作成が求められる．

4.1.2 RC ヘリコプタシミュレーションシステムの必要性

RC ヘリコプタは，経験者でないとわからない独特な動きをする機体である．初心者が簡単に動かせるものでないことは前章までに説明した通りである．

その為，シミュレータでの学習が必要になるが，シミュレータといっても現実と酷似した環境をシミュレートできるわけではない．シミュレータの限られた機能を使用し，効率的に学習させる為には，実際の機体とその挙動，操作性などの特徴を捉え，忠実に再現する必要がある．また，再現できない特徴などは，擬似的な効果などを使用して学習させる必要がある．

4.1.3 RC ヘリコプタ操縦支援システムの必要性

GP ヘリコプタでの学習は，RC ヘリコプタの操縦技術学習には必ず必要になる．シミュレータだけの学習では，実機を自由に操縦する技術を得るまでには至らない．

シミュレータでの学習と異なり，操縦を間違えると人や建物に重大な被害を与える可能性がある．GP ヘリコプタの学習には細心の注意を払う必要がある．

また，操縦のしやすさを向上させる為に，**RC ヘリコプタ操縦支援システム**を適用する．こ

のシステムについては次項で述べる．

4.2. RC ヘリコプタ操縦支援システムの概要

実際のヘリコプタより RC ヘリコプタの方が操縦することが難しいと言われる理由の一つは，操縦者が直観的にヘリコプタと目的地の位置と姿勢を知ることができないということにある．

その問題の解決策として，本研究では，HMD を用いて操縦者に没入感を与えることにより，操縦をより直感的に理解させ，早期に飛行技術を獲得させるという手法を提案する．

図.7 HMD の一例（Data Glass 2/V）

図.8 人の視点での操作例

図.9 搭載したカメラからの映像例

通常，人が RC ヘリコプタを操作しようと思うと，まず機体の状態を把握する為に機体を見る．その挙動から次の動きを予想し，風の流れや周囲の状況を確認しつつ飛行させる．5.1 の FMS (Flying Model Simulator)の操作画面で表すと，ちょうど図.8 のような視点で操作していると置き換えられる．

高度が高くなると，周囲の状況よりもどのくらい風に流されているか，機体がどの程度傾いているかが重要になってくる．ヘリコプタはその構造上，ロータの回転面が少しでも傾いていると，その傾きが加速度的に大きくなる．その為操縦者は，その傾きを常に打ち消すように操作しないと，気づいた頃には思った位置よりも遠いところに機体が流されているという状況になる．

RC ヘリコプタは，高度が高くなるにつれ，機体の傾きや機首の方向などが判断しづらくなり，操縦が難しくなる．言い換えると，操縦者と機体の距離が遠くなるほど，操縦に必

要な情報量が減っていくということである．これを図で示すと図.10 になる．

情報は二者間のみで，相対距離が離れるほど情報は減衰する．

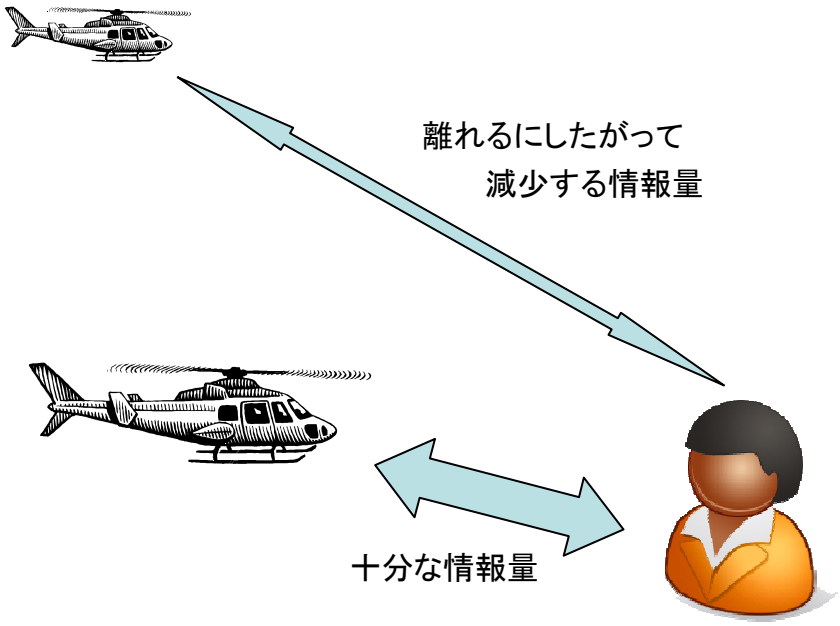


図.10 目視確認のみの場合の視覚的情報量

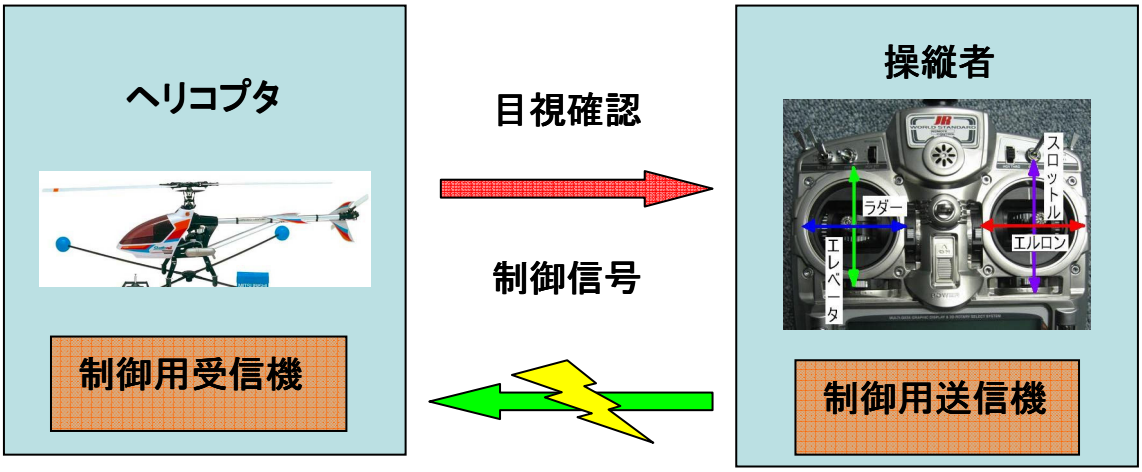


図.11 通常の RC ヘリコプタ操縦システム概要

そこで，図.11 のような通常の RC ヘリコプタの操縦形態に加え，機体にカメラや傾度計を搭載することで，相互の距離が開いた場合でも，常に一定の情報量を確保できると考えた．そのシステムを図.12 に示す．

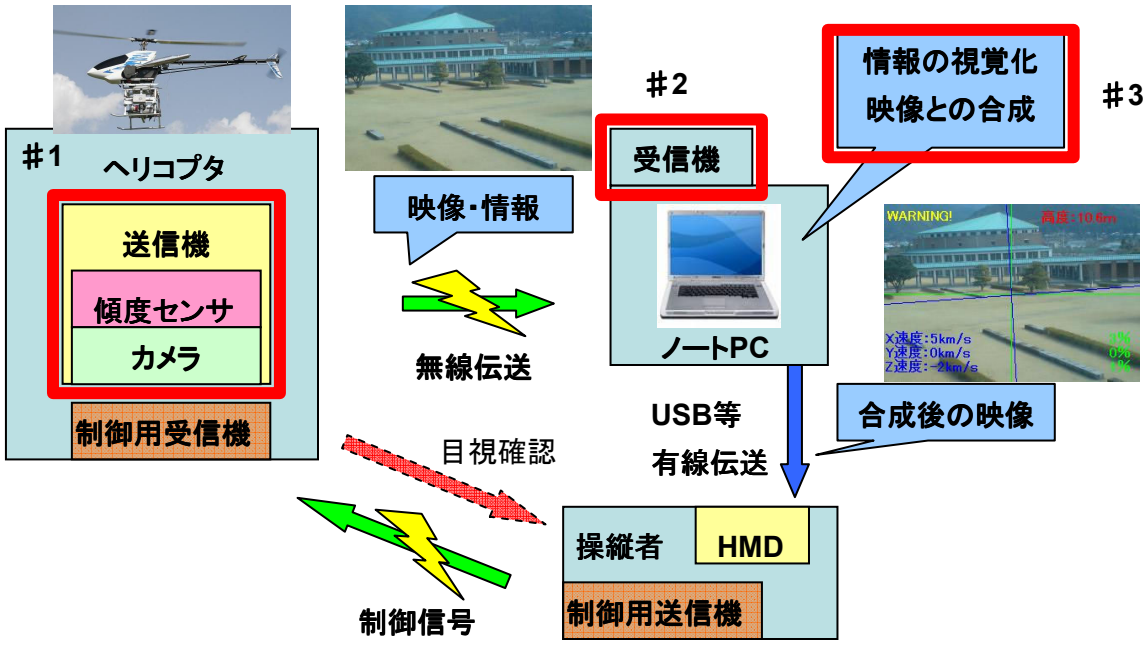


図.12 RC ヘリコプタ操縦支援システム概要（イメージ）

これが今回提案する，RC ヘリコプタ操縦支援システムの概要である．太枠で囲った部分が，システムとして新たに開発する必要がある部分を示す．（＃1-3）

まず，ヘリコプタに傾度センサとカメラ，送信機を搭載し，その情報を PC に送る．その際，操縦者に傾度を感覚的に認識させる為に，数値でなくグラフィックで表示する．この処理を PC 内で行い，カメラからの映像と合成，HMD に表示させる．

操縦者は機体を移動させるとき以外は，常に定位置に機体をとどめておく必要がある．その為の指標として，機体の傾度がわかる映像を参考にする．

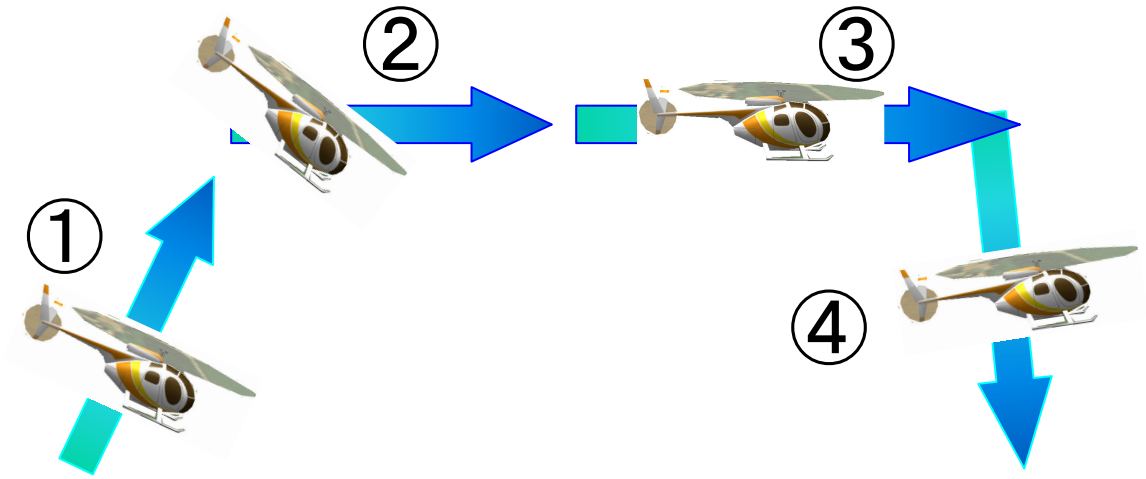


図.13 RC ヘリコプタの離陸から着陸までの流れ

RC ヘリコプタの一連の飛行の流れを図.13 に示す．

①離陸
②移動飛行
③ホバリング
④着陸

RC ヘリコプタの動作は，以上の四つの動作に分けられる．①の離陸に関しては，図.10 で示すように情報量が十分な為，目視確認のみで行うのが良いと考える．

②の移動飛行中も，カメラの映像だけではどこへ飛んでいるのか判断しかねるので，目視で確認が必要になる．主に③のホバリング時と④の着陸時に，RC ヘリコプタ操縦支援システムが重要となってくる．

また，カメラからの映像，目視での確認の切り替えを素早く行う為には，図.7 で示すような単眼式の HMD が適している．

4.3. RC ヘリコプタ操縦支援システムの構築手順

第一段階として，実際の RC ヘリコプタ（GP ヘリコプタ）とシミュレータ上のヘリコプタの比較を行う．そして操作性の違いなどを把握したあと，シミュレータ上で実環境に近いシミュレーション空間を構築する．

第二段階は，システム構築の容易なシミュレータ上で操縦支援システムを作成し，操縦支援システム使用時と通常操作との比較をし，有効な操縦支援を得る為の操縦支援画面を作成する．

最終段階は，シミュレータ上で得られたデータをもとに支援に必要なシステムを実機に適用し，操作性の向上などが認められるか検証する．

5. 実験

5.1. Flying Model Simulator (FMS)を用いた実験

手軽に PC で実現できるフライトシミュレータに，Flying Model Simulator (FMS)というものがある．

飛行機やヘリコプタの機体，地面や障害物などを自作することもでき，自由度の高いソフトウェアとして世界中で広く利用されている．

シミュレーション空間は，一辺が 1km の立方体になっている．市販のプロポ(コントローラ)にも対応し，実際のプロポと同様の操作で飛行シミュレートが行える．

また，画面左上に高度と機速，上昇速度を表示することもできる．

図.14 カメラ追跡モード

図.15 カメラ固定モード

FMS の操作画面は，図.12 と図.13 の二種類がある．

図.14 のカメラ追跡モードは，テレビゲームなどに良く見られる機体を常に後ろから捉えた映像で，現実で常にこの視点で操縦するのは不可能である．

図.15 のカメラ固定モードは，カメラが操作空間の一定位置に固定され，機体の動きを追って画面が左右に移動する．実際に RC ヘリコプタを操縦する感覚に近い映像が得られる．

また，どちらの操作画面でもズーム機能が有効である．

この機能を使用することで, FMS を用いて擬似的に RC ヘリコプタに搭載したカメラからの映像を作り出せると考えた．

通常のカメラ追跡モードでは，図.16 の視点①に示す位置からの映像を表示している．

その為，機体全体が映し出されて，操縦者が機体の傾きや周囲の状況を知ることができる．

このときにズーム機能を使って，視点②の位置まで持ってくると，ちょうど機体にカメラを搭載したかのような映像を得ることができる．しかし，この状態では視界が機体にさえぎられ，映像のほとんどが見えない．

そこで，透明な機体を自作し，カメラからの映像を再現した．

しかし，カメラ追跡モードは，機体の後方からの視点であって，機体に固定された視点ではない．その為に，機体が傾いても，視点が傾くのはそれより少し遅くなる．

図.16 カメラからの映像イメージ(機体名：Hughes)

そこで, 図.17 のような立方体を Metasequoia という 3D モデリングソフトを用いて作成，これを機体として使用することにした．FMS では，機体データはモデル用と演算用の二種類用意する必要がある．空気抵抗などは演算用のデータをもとにシミュレートする為，外観だけを変えても RC ヘリコプタの操作性は変わらない．

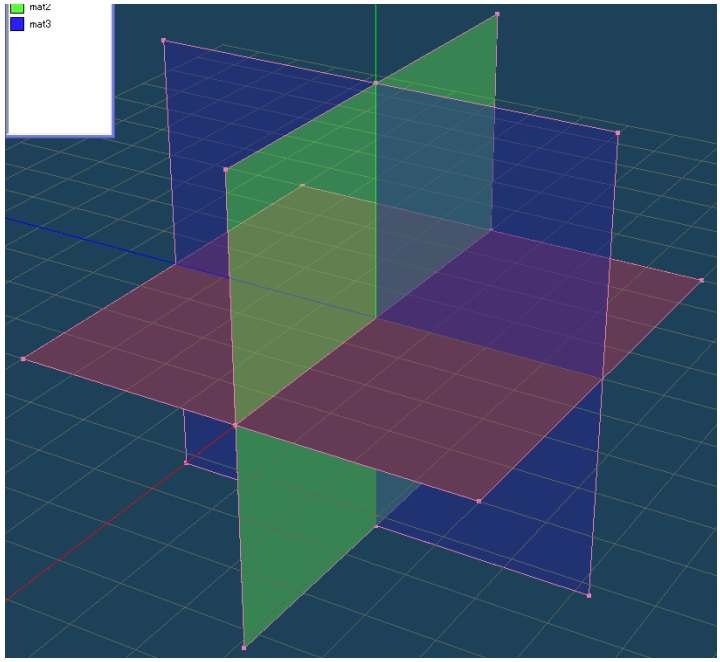


図.17 機体モデル

図.15 は，XYZ の各平面に色をつけた立方体で，これを機体として操縦することで機体の傾きや重心位置の把握が可能になると考えた．

この機体で操縦すると，操縦画面は図.18 のようになる．

機種は真正面を向いているので，青い平面はこの状態では見えない．赤い平面が見えているのは，機体より若干上に視点があるからである．正しくホバリング出来ていると，赤い平面も青い平面も線になって見えない．

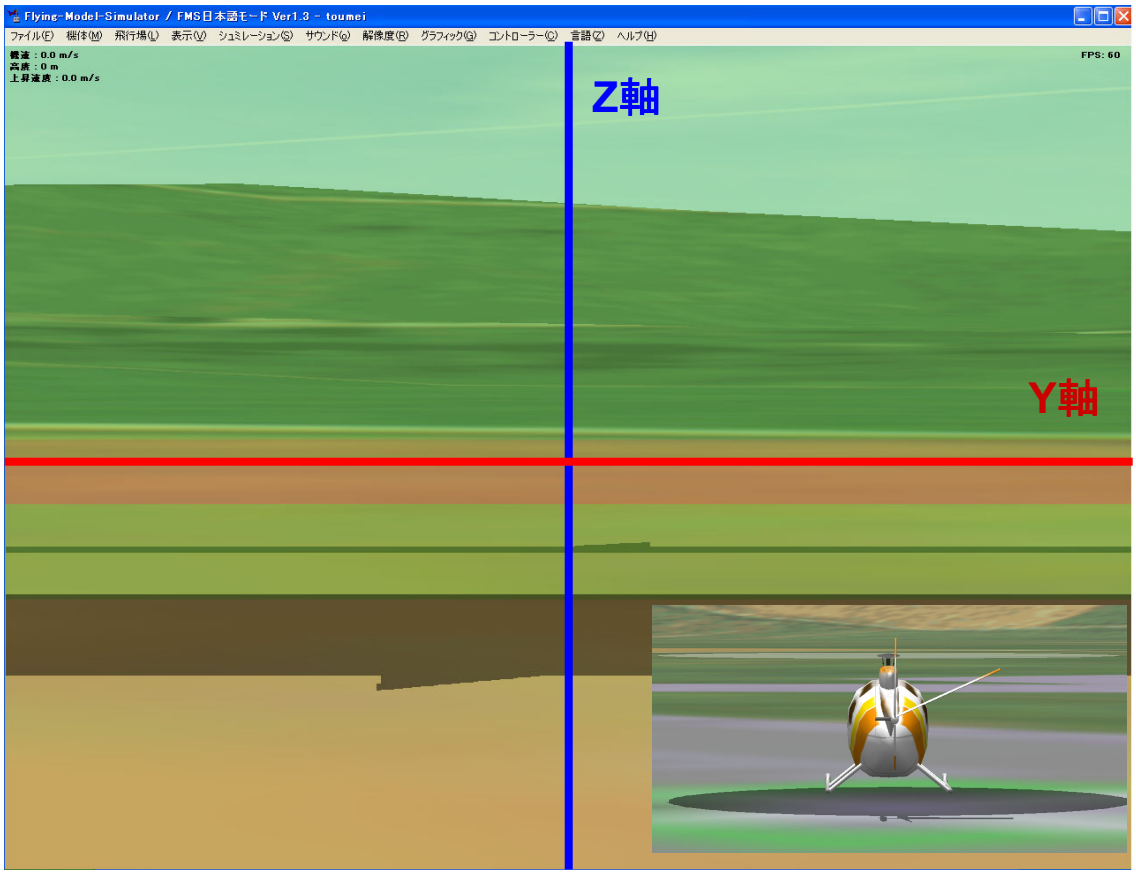


図.18 機体モデルでの操縦画面とその時の機体のイメージ

5.1.1 機体モデルの操作性検証実験

この図.18 の画面での操作と，通常のカメラ固定モード(RC ヘリコプタ擬似操縦画面:図.14)の操作を，RC ヘリコプタの操縦経験がない 8 名の被験者に行ってもらった．

操縦時間は各モード 10 分ずつである．操縦後，全員に各モードの長所と短所を述べてもらった．以下の表.4 に実験から得られた結果を示す．

1、RC ヘリコプタ擬似操縦画面モード
- FMS のカメラ固定モードでの操作(図.15)
- 実際の RC ヘリコプタを操縦するような感覚に近い
- 機体は FMS に付属している Hughes(図.16)を使用

2、機体モデル操縦画面モード
- FMS のカメラ追跡モードでの操作(図.14)
- RC ヘリコプタに搭載したカメラからの映像に近い

・機体は自作した機体モデル(図.17)を使用

表.4 被験者の感想

	RC ヘリコプタ擬似操縦画面	機体モデル操縦画面
長所	距離感がわかりやすい 速度が感覚的にわかる	傾きが正確にわかる 着陸が容易
短所	操作が難しい 微妙な傾きがわからない	前後左右の情報がない 高度が把握しづらい 相対位置が捉えづらい

被験者の感想から，FMS で RC ヘリコプタを操縦する場合，機体の傾度や速度，高度などの情報が重要であるということがわかった．

今回の実験では，FMS を用いた為，操縦画面は常に水平で，傾度を半透明の面で表した．しかし，実際に GP ヘリコプタにカメラを搭載した場合，機体が傾けば映像も傾く為，今回使用した図.19 のような映像ではなく，図.20 のような映像が得られるはずである．

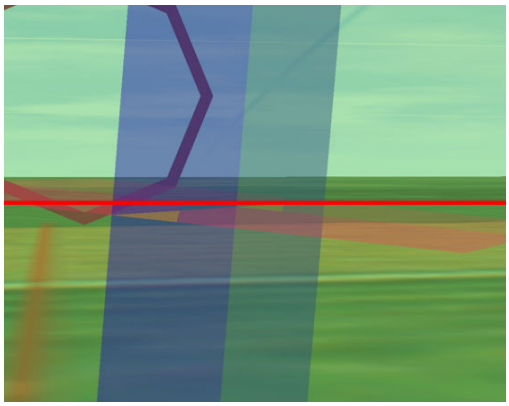


図.19 今回の実験で使用した擬似操縦画面

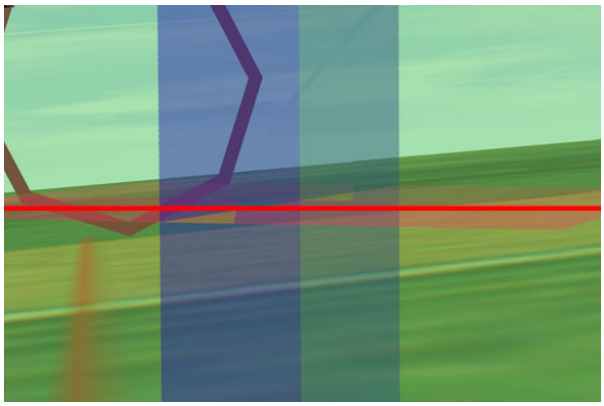


図.20 カメラからの映像のイメージ

5.1.2 傾度情報の表示方法についての評価実験

表.4 で示した感想の他に，擬似機体モデルに対する意見として，以下のようなものがあった．

・水平軸に対する傾きのみの表示で十分なのではないか

・立方体でなく，球体のモデルではどうか

・紙飛行機のように，水平面に垂直尾翼のようなものをつけてはどうか

これらの意見を参考に，以下の 3 つの機体モデルを作成した．

① 図.17 の赤い平面（機体の水平度）のみ表示

② 球形機体モデル(図.21)

③ 紙飛行機型機体モデル(図.22)

どのような表示方法が，操縦者により直感的な理解をもたらすのか，先の実験の被験者に①から③の各機体 5 分ずつ操縦してもらった．

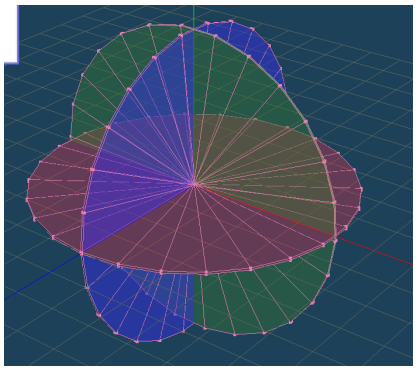


図.21 球形機体モデル

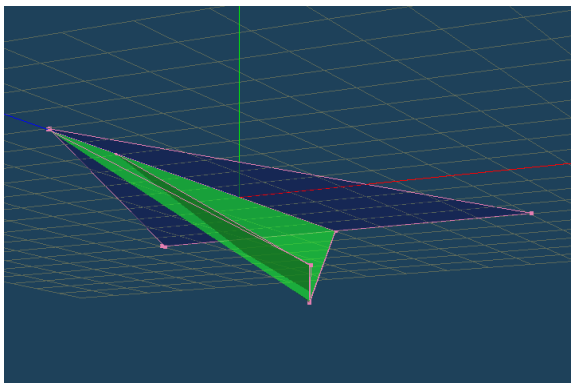


図.22 紙飛行機型機体モデル

この実験で被験者に一番操縦しやすいモデルを選んでもらうと，③の紙飛行機型機体モデルという意見が多かった．

①の機体では，機種がどの方向を向いているのかわからず，水平を保てなかった．

②の球形機体モデルは，実際に FMS で使用すると操縦者の見た目としては図.18 の操作画面と変わらなかった．

③の紙飛行機型機体モデルは，矢印のように先端が尖っているので，機種の方向がわかりやすく，操作しやすいという意見が多かった．

以上の実験から，エルロンの傾きが操縦者にとって必要な情報であるということがわかった．

5.2. X.R.B V-2 BELL222 を用いた実験

5.2.1 振動について

ヘリコプタの振動には外力により加振されて生じる強制振動と，外力の有無によらず振動系の中で起こる自励振動がある．強制振動のうち，定常的な外力によって持続的に加振されて生じる振動を定常振動と言う．[7](付録参照)

ヘリコプタには常に振動が発生し，カメラを搭載すれば必ず映像にも振動がノイズとして表れる．そのノイズについて，X.R.B V-2 BELL222 を使って検証することにした．

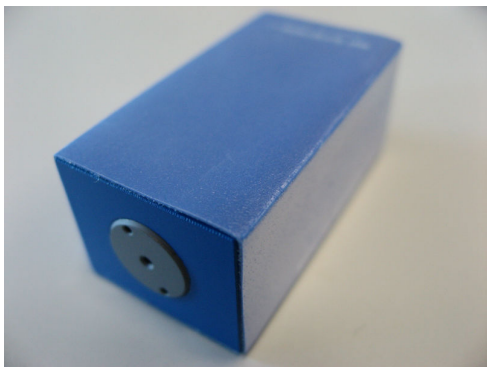


図.23 RS SYSTEM lab 製カメラ RC-12

図.23 が X.R.B V-2 BELL222 に搭載したカメラである．表.5 にその仕様を示す．

受信機は AC100V 電源で駆動し，映像をビデオ出力で行う為，テレビ等のモニタが必要となる．ヘリコプタに発生する振動が映像にどう影響するのか，実験してみた．概要を図.22 に示す．受信機とテレビモニタを接続し，ヘリコプタのアクセスケーブルにスポンジで包んだカメラをビニールテープでくくりつけた．

表.5 RC-12 の仕様

撮影素子	1/4 インチ 27 万画素カラーCMOS
レンズ	φ0.8mm ピンレンズ
送信可能距離(直線距離)	30[m]
トランスミッタ(送信周波数)	1.2[GHz]
連続動作時間(充電式内臓電池)	45[min]
サイズ	15×18×35[mm]
重量	14.7[g]

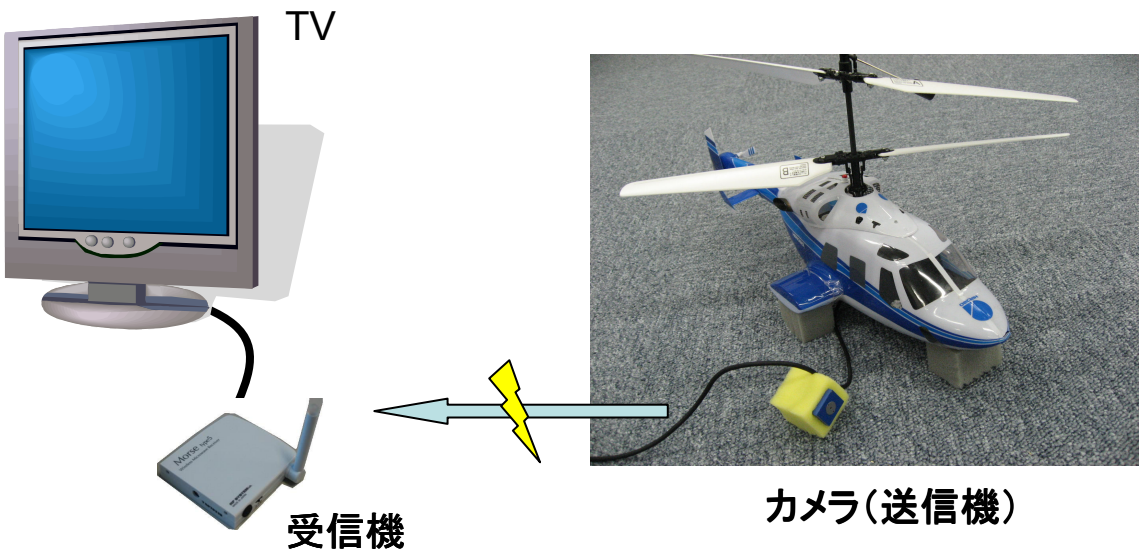


図.24 実験概要

この実験で得られたカメラ映像が図.25 である．

図.25 ヘリコプタに搭載した小型カメラからの映像

図.25 はホバリング時に得られた映像で，機体は安定している．しかし，映像が NTSC 方式ということもあり，映像が重なって見えるが，機体自体の振動もかなり激しいことが良くわかる．これでは映像を見ながら操縦することは不可能である．

カメラを固定したのがアクセスケーブルだったことも原因であるが，カメラがトランスミッタ内臓型だったというのも振動がノイズとして現れた理由の一つである可能性がある．6.1 で述べるが，これは小枝らの研究[5]からわかっている．

機体の振動は HMD を見ながら操作する上で，直接関わってくる問題なので，振動の減衰については十分考慮する必要がある．

5.2.2 シミュレータでの学習による飛行操縦の比較実験

シミュレータでの学習の有効性を検証する為に，今回提案した擬似操縦支援画面(図.17)で 15 分間練習した被験者と，全く RC ヘリコプタを扱ったことのない初心者とで，X.R.B V-2 BELL222 を操縦してもらった．

各 3 人ずつ，20 代の被験者に 10 分間自由に飛行してもらった．

両者の違いは明らかで，全くの初心者の場合，離陸さえままならない状況で，とてもホバリングまでできなかった．

シミュレータで学習した被験者は，離着陸時のスティック操作を適切な力加減で行っていたので，安定して飛行できていた．しかし，15 分程度の練習では完全なホバリングや離陸などは行えなかった．

シミュレータで学習した場合と何もしない場合では，少しでも練習したほうがヘリコプタの特性を把握でき，上手く操縦できることは明らかだった．

ただ，屋外用の大型な GP ヘリコプタで操縦する場合は数十分のシミュレータでの学習では不十分である．

これは今後の課題である．

6. 問題点と解決案

RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムは，図.5 に示す通り，

Ⅰ，資料映像・文章
Ⅱ，シミュレータ
Ⅲ，GP ヘリコプタ

の三つの部分からなっているが，それらを構築する上で解決しなければならない様々な問題があることがわかった．その問題とは，

A，機械的な問題
B，ユーザーインターフェースの問題
C，シミュレータ作成における問題
D，操縦支援映像作成における問題

大きく以上の四つに分けられる．

6.1 機械的な問題

機械的な問題には，ヘリコプタに発生する振動などがあり，主にⅢの GP ヘリコプタの部分にあたる．今回の X.R.B V-2 BELL222 を用いた振動の実験では，トランスミッタを内蔵したカメラを使用した．

小枝らの研究[5]結果から，カメラを固定しても，トランスミッタをフリー(半固定)の状態にし，振動がなるべく伝わらないようにすれば，映像にノイズが入りにくいことがわかっている．これについて更なる調査が必要である．

実際に GP ヘリコプタにカメラを搭載するときは，以上の事に注意して実験を進める．

6.2 ユーザーインターフェースの問題

図 26 に示すように，即時的な情報理解を促す為の支援映像作成について， 5.1.2 で評価実験を行った．ここでは FMS を用いて傾度情報の表示方法について検証した．

しかしこれだけではまだ不十分で，実際に GP ヘリコプタに搭載したときにも同様の実験を行う必要がある．

また，傾度を映像で表現した映像と，カメラ映像を合成しただけでは，シミュレータほど没入感が得られないという点も，今後解決する必要がある．

図.26 操縦支援映像作成のイメージ

没入感の問題に関して，小枝らの研究[5]で，機体の左右の流れが没入感を得るために重要な事がわかっている．機種の方向の映像だけでなく，左右の映像も同時に何らかの形で表示することで没入感を得るという解決策をとる．

6.3 シミュレータ作成における問題

5.2.2 のシミュレータでの学習による飛行操縦の比較実験で，シミュレータでの学習の有効性が示せた．しかし，GP ヘリコプタを操縦する上でも有効かどうかはまだ実験が必要である．GP ヘリコプタの場合にも有効なシミュレーション空間を作成するには，現在使用している FMS だけでは不十分である．

操作感覚を学習させるためのシミュレータ，実験の最終段階として，操縦技術の向上を量るための指標としてのシミュレータを，新たに作成する必要があると考える．

6.4 操縦支援映像作成における問題

本研究で最も重要な部分である，操縦支援映像を作成するソフトウェアに関する問題がある．映像をリアルタイムで HMD に表示するだけであれば，先行研究[5]の実績もあり特に問題はない．しかし，傾度情報の映像化，カメラ映像との合成，タイミングの同期などを考えると，多少のタイムラグが発生する可能性がある．

7. おわりに

RC ヘリコプタ操縦支援システムの構築手順を 4.3.で説明したが，表にすると以下のようになる.

表.6 RC ヘリコプタ操縦支援システムの構築手順

第一段階	・ 実際の RC ヘリコプタとシミュレータの比較 ・ 操作性の違いの検証 ・ 実環境に近いシミュレーション空間の作成
第二段階	・ シミュレータ上での支援システム作成 ・ 支援システム使用時と通常時の操作比較 ・ 有効な操縦支援画面の作成・考察
第三段階	・ システムの実機搭載 ・ 操作性の向上を検証

現在の進捗状況として，第二段階まで一通り終了した状態である.

しかし，5.の実験結果などから見ても，まだ十分考慮する必要がある.

また， RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システム作成を構成する 3 つのシステムにおけるそれぞれの課題を表にすると，以下のようになる.

表.7 今後の課題

資料映像，文章の作成	・ 初心者にわかりやすい文章の作成 ・ 飛行までに必要な道具，予備知識等の文章化 ・ 文章化できない箇所の映像での表現など
シミュレータの作成	・ FMS でのシミュレーション空間作成 ・ シミュレーションプログラムの作成 ・ ユーザーインターフェースの検討
RC ヘリコプタ操縦支援システムの作成	・ 必要な機材の製作（送受信機等） ・ カメラの検討 ・ 操縦支援映像作成ソフトの作成 ・ 振動対策など

本研究で行った実験では，RC ヘリコプタの傾度情報はカメラからの映像を見て操縦する場合，必要十分な情報であり，この情報が得られるシミュレータは初心者にとって操縦技術を学習させるために有効であることが示せた.

さらに，RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムの実現に，表.7 で示すような課題があることがわかった.

これらの結果は，RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムが初心者にとって， RC ヘリコプタの操縦技術を学習する上で有効な手段となる可能性を示している.

今後の研究において，6.1－6.4 のような課題を解決し，RC ヘリコプタ操縦技術学習支援システムの完成を目指す.

謝辞

本研究の遂行にあたり，少なからずの御指導，御助言を賜りました星野孝総准教授に深く感謝します.

また，研究導入，論文執筆の上で多くを学ばせて頂きました立命館大学の小枝 正直先生にも厚く御礼申し上げます.

本研究のヘリコプタに関する様々な事でご協力，ご指導を賜りましたデイトナに厚く御礼申し上げます.

研究活動に限らず，様々な事でご協力，ご理解を頂きました星野研究室の方々に心より感謝の意を表します.

最後に，四年間の大学生活を支えてくれた家族に深く感謝いたします.

参考文献

[1] 志茂 洋二　無人ヘリコプタによる送電線巡視点検システムの開発，電気学会誌，Vol. 126, No. 3, pp.168-168　2006 年

[2] 小森谷　小型無人ヘリコプタの研究　開発国際レスキューシステム研究機構　平成 14 年度成果報告書　2003 年

[3] ヘリコプタ位置映像表示システム　三菱電機技報　三菱電機　2004 年 5 月号

[4] 多山哲郎，北村新三　RBF ニューラルネットを用いた強化学習による RC ヘリコプタの制御　神戸大学　2002 年度卒業論文

[5] 小枝正直　無人ヘリコプタの遠隔操縦システム　奈良先端科学技術大学院大学　2002 年度修士論文

[6] X.R.B V-2 BELL222　取扱説明書　ヒロボー株式会社

[7] 航空工学講座 11 ヘリコプタ　齋藤光平，中野満紘，上野誠，山内信義，吉村勉，冨尾武，伊藤純夫，　社団法人　日本航空技術協会　2005 年

付録

・定常振動

ヘリコプタの振動において，ロータに起因する振動はもっとも問題になる．ロータ回転数の n 倍の振動数は，1 回転につき n 回の振動が生じるので，n/rev で表す．

例えば 300rpm で回転するロータで 3/rev の振動は，

300rpm / 60sec × 3 = 15Hz となる．

a.低周波振動

ブレードの遠心力のアンバランス，トラッキング不良(ロータの回転軌道が不安定)によって発生する 1 回転に 1 回(1/rev)の低い周波数振動．

b.中間周波振動

メインロータの空気力加振による振動で，1 回転につきブレード枚数 b/rev の振動が生じる．

c.ブレードの振動

ブレードに働く空気力は，ブレードが 1 回転する間にも複雑に変化している．ブレードは回転数の整数倍の振動数で振動し，振動力の大きさは振動数が高いほど小さい．

d.ブレードから機体に伝わる振動

ブレードから機体に伝わる振動としては，振動数の変換が起こる場合と，各ブレードの振動が重なり増幅・相殺される場合がある．

前者の場合，振動の方向によって，回転系から非回転系への振動の伝達で，振動数の変換が生じることがある．

A Hz で回転している系が B Hz で振動している場合，非回転系へ伝わる振動は $(B\text{-}A)$Hz，$(B\text{+}A)$Hz となる．

この二つの事象により，各ブレードが全く同じ特性で完全にバランスが取れている場合，機体に伝わる振動はロータの回転数×ブレードの枚数の整数倍の周波数だけになり，それ以外の周波数の振動は相殺される．

その他の周波数の振動が検出されれば，それはロータに何らかのアンバランスが生じていることになる．

・自励振動

e.機械的不安定

地上共振と呼ばれる現象がこれに含まれる．ブレードのドラッギング運動と接地状態のヘリコプタの機体全体の運動が連成して起こる機械的な自励振動である．

この 2 つの運動の固有振動数が近づくと，ロータの重心位置が不安定に振れ回り，

機体が急激に揺れる．空中でもこのような自励振動は発生し，空中共振と言う．

ドラッギング運動(図.27，図.28)とは，回転軸とブレードの固定軸が同一でないため，空気抵抗などによってブレードの傾き(ドラッグ角)が変わる現象である．

f.空気力学的不安定(フラッタ:Flutter)

空気力が関係して生じる自励振動で，失速するブレードに生じる振り運動(失速フラッタ)や，ブレード先端が波状の奇跡を描くウィービングという現象などがある．

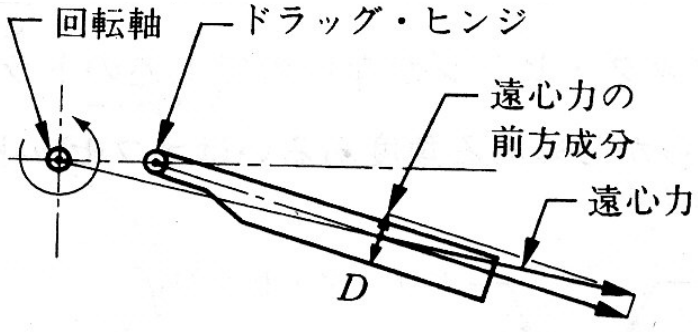


図.27 通常前進飛行時のブレード例

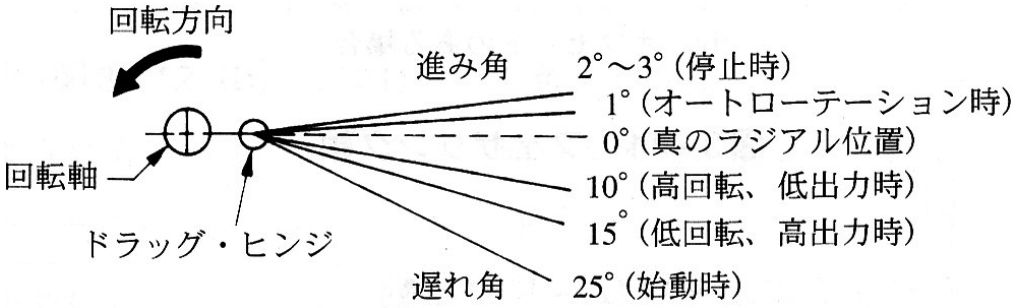


図.28 ブレードのドラッギング運動